

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Бауэр Светланы Михайловны на диссертацию Сибирева Алексея Владимировича на тему «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

.Одной из задач механики деформируемого твердого тела является изучение процессов деформирования материалов, испытывающих фазовые превращения. К таким объектам можно отнести сплавы с памятью формы, в которых необычные механические свойства, такие как эффект памяти формы и псевдоупругость, обусловлены термоупругими мартенситными переходами – фазовыми переходами первого рода, которые могут быть инициированы изменением температуры или напряжения. К настоящему времени установлена связь между процессами деформирования, особенностями фазовых переходов и структурой сплавов при однократной реализации того или иного эффекта памяти формы. Это позволило создать математические модели, описывающее функциональное поведение сплавов с памятью формы в простых режимах, например, при деформировании и последующем нагревании, или при однократном охлаждении и нагревании под напряжением. Вместе с тем, существует большое количество применений сплавов с памятью формы, в которых элемент из этого материала подвергается многократным теплосменам, т.е. эффекты памяти формы воспроизводятся многократно. Например, термомеханические приводы, которые применяются в авиационной и космической технике, автомобилестроении, медицине и других отраслях, в которых изменение напряжения и деформации наблюдается многократно. Моделей для описания функционального поведения сплавов с памятью формы при многократной реализации мартенситных переходов немного, а их предсказательная сила невелика. Это связано, в первую очередь с тем, что до сих пор не установлена взаимосвязь между изменением структуры, плотности дефектов, мартенситными переходами, обратимой деформацией и напряжениями при многократных теплосменах. Поэтому тема диссертационной работы Сибирева А.В., посвященной исследованию взаимосвязи между режимами термоциклирования, температурами мартенситных переходов, обратимой и необратимой деформации и реактивным напряжениям, **является актуальной.**

В ходе выполнения диссертационного исследования получены **новые** данные о механизмах деформации сплавов с памятью формы и установлены причины термоциклической нестабильности свойств сплавов на основе NiTi. Обнаружено, что повышение максимальной температуры в термическом цикле способствует возрастанию температур превращения и изменению обратимой деформации, что связано с уменьшением плотности дефектов кристаллической решётки. Это указывает на то, что максимальную температуру в цикле можно использовать для контроля изменения температур переходов и обратимой деформации при термоциклировании. Выявлена

нелинейная зависимость между плотностью дефектов и изменением температур мартенситных переходов в сплаве NiTi при многократных теплосменах. Установлено, что в отожжённом сплаве NiTi последовательность исчезновения кристаллов мартенсита при нагреве не совпадает с очередностью их образования при охлаждении, что свидетельствует об отсутствии микроструктурной памяти. Однако в образцах, подвергнутых активному деформированию в мартенситном состоянии, формируется дислокационная структура, создающая стабильное поле внутренних напряжений, что способствует сохранению микроструктурной памяти. Показано, что наибольший прирост плотности дефектов наблюдается во второй половине прямого мартенситного перехода при охлаждении. Исключение этой части температурного интервала при термоциклировании позволяет существенно повысить стабильность свойств сплава NiTi. Новым результатом является и установленная нелинейная зависимость между реактивным напряжением и деформацией при нагревании сплава NiTi в режиме привода. Выявлено, что при высоких жёсткостях контртела величина реактивных напряжений ограничена напряжением дислокационного течения аустенитной фазы. Показано, что положение минимальной и максимальной температур цикла относительно температур мартенситного перехода влияет на функциональные свойства и накопление необратимой деформации в сплаве NiTi, поскольку позволяет исключить температурные интервалы, в которых происходит накопление необратимой деформации при охлаждении и нагреве. Определены оптимальные параметры температурного цикла, при которых достигается максимальная работоспособность сплава и минимальное накопление пластической деформации

Теоретическая значимость исследования заключается в выявлении новых знаний о влиянии плотности дефектов на температуры мартенситных переходов, а также на обратимую деформацию и реактивные напряжения при термоциклировании сплава NiTi. Установлена связь между долей прямого и обратного переходов и стабильностью функциональных свойств сплава при термоциклировании, что должно быть использовано для разработки моделей, описывающих изменение функциональных свойств сплавов с памятью формы при многократных теплосменах. Практическая значимость заключается в создании рекомендаций по выбору оптимальных силовых, деформационных и температурных режимов для работы приводов на основе сплавов NiTi.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 197 страницах, содержит 86 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 160 библиографических ссылок.

Во **введении** обосновывается актуальность исследования. Представлен очень краткий анализ некоторой литературы, связанной с тематикой диссертации. Описана практическая ценность работы, новизна полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту. Описаны методы исследования. Отмечается, что были специально разработаны методики исследования, позволившие получить новые результаты.

**Первая глава** посвящена исследованию изменения функциональных свойств сплава NiTi при термоциклировании через полный интервал мартенситных переходов. Показано, что дефектная структура, сформированная при термоциклировании, является нестабильной. Плотность дислокаций и их пространственное распределение изменяются с каждым циклом, что приводит к изменению температур фазовых превращений. Любые

процессы, такие как повышение максимальной температуры в цикле, изотермическая выдержка, изменение напряжения при термоциклировании дополнительно изменяют дислокационную структуру, что влияет на изменение температур мартенситного перехода и функциональные свойства. Показано, что нестабильная дислокационная структура является причиной отсутствия «микроструктурной памяти» при формировании и исчезновении мартенсита при охлаждении и нагревании. Показано, что формирование стабильной дислокационной структуры в сплаве TiNi, например, за счет деформирования в мартенситном состоянии, способствует «микроструктурной памяти».

Во **второй главе** изучено влияние долей прямого и обратного мартенситных переходов на стабильность функциональных свойств сплава при термоциклировании под постоянным напряжением. Показано, что уменьшение доли переходов, включенных в термоцикл, повышает стабильность свойств и снижает накопление необратимой деформации при термоциклировании. Максимальная стабильность функциональных свойств при термоциклировании наблюдается в том случае, если при охлаждении исключена вторая половина прямого перехода. Это связано с тем, что максимальное изменение плотности дефектов наблюдается именно во второй половине температурного интервала вследствие активации механизмов необратимой пластичности. Стабилизация функциональных свойств сплава при уменьшении доли обратного перехода обусловлена тем, что уменьшение максимальной температуры в цикле затрудняет процессы возврата и это препятствует увеличению плотности дефектов в следующем цикле. Таким образом, впервые показано, что, контролируя долю прямого и обратного перехода при термоциклировании под постоянным напряжением, можно управлять стабильностью функциональных свойств сплава TiNi.

**Третья глава** посвящена исследованию изменения функциональных свойств сплава TiNi при термоциклировании в режиме привода. Этот режим отличается от термоциклирования под постоянным напряжением тем, что в режиме привода при охлаждении и нагревании меняются и деформация и напряжение. Установлено влияние параметров привода (жесткости системы, предварительной деформации, режима предварительного деформирования) на изменение функциональных свойств сплава TiNi при термоциклировании. Показано, что зависимость между реактивным напряжением и деформацией является нелинейной. На основании этого было определено, что наибольшую работу сплав совершает при жесткости контртела в диапазоне 6-10 ГПа. Впервые изучено влияние доли прямого и обратного перехода на изменение функциональных свойств при термоциклировании в режиме привода и показано, что оно аналогично тому, что было обнаружено в режиме термоциклирования под постоянным напряжением. Впервые изучено влияние положения минимальной и максимальной температур в цикле относительно температуры мартенситных переходов на стабильность свойств при термоциклировании. Это позволило определить оптимальные режимы термоциклирования сплава TiNi в режиме привода, обеспечивающие стабильные функциональные свойства, совершенную работу и минимальную необратимую деформацию. На основании этого разработаны рекомендации по выбору режимов термоциклирования сплава TiNi, которые были апробированы для специально созданного привода и показано, что изменение свойств в оптимальном режиме меньше, чем при термоциклировании в полном интервале температур.

По содержанию и оформлению работы следует сделать следующие замечания:

1. В диссертации большинство экспериментов были выполнены в режиме кручения, при котором реализуется неоднородное напряженное состояние. Почему был выбран именно этот способ испытаний, и как изменятся выводы работы, если термоциклические испытания проводить в условиях сжатия или растяжения образцов?
2. Почти все исследования в работе проведены для сплава одного состава (Ti50Ni50). Какова общность полученных результатов? Применимы ли выводы и основные положения диссертации для других материалов с памятью формы, в частности для сплавов TiNi другого состава?
3. К сожалению, в диссертации не сформулированы теоретические положения для численного расчета и прогнозирования деформационного поведения сплава TiNi в условиях термоциклирования. Это в значительной степени обедняет диссертацию.
4. Текст диссертации содержит большое количество опечаток, неправильных окончаний и неудачных выражений, что сильно затрудняет чтение и понимание текста.

Основные результаты работы представлены в 33 публикациях, из которых 17 статей опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. Также результаты докладывались на российских и международных конференциях.

Диссертация Сибирева Алексея Владимировича на тему: «Оптимизация температурных условий термоциклирования для стабилизации деформационно-силовых характеристик сплава NiTi с памятью формы» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Сибирев Алексей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета,  
Доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Профессор кафедры теоретической  
и прикладной механики СПбГУ

*С.М. Бауэр*

Бауэр Светлана Михайловна

19.11.2024

